

О РАБОТЕ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ С ВЫСОКОЙ ДОЛЕЙ ОКАТЫШЕЙ В ШИХТЕ

А.В. Павлов¹, О.П. Онорин², Н.А. Спирин², И.Е. Косаченко¹

¹ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»
(г. Магнитогорск, Россия)

² ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
(г. Екатеринбург, Россия)

Представлены результаты анализа физико-химических свойств агломерата и окатышей. Показано, что при переводе доменной плавки на режим работы с высокой долей неофлюсованных окатышей в шихте печей необходимо менять основные параметры шлакового режима, а также режим загрузки печей. Установлено, что из-за различия в физико-механических свойствах агломерата и окатышей, а также вследствие высокой агрессивности первичных шлаков, получающихся из неофлюсованных окатышей, необходимо менять режим загрузки материалов в печь. При возрастании доли окатышей Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного производственного объединения (ССГПО) в шихте доменных печей ОАО «ММК» наблюдается снижение магнезии в конечных доменных шлаках. Это сопровождается возрастанием вязкости шлакового расплава, снижением его серопоглодительной способности, а также ростом температурного интервала плавления железорудной смеси с увеличением нижнего перепада давления газа и ограничением форсировки плавки дутьем.

Ключевые слова: окатыши, агломерат, физико-химические свойства, соотношение расходов, производительность, расход кокса, свойства шлака.

The results of the analysis of physical-chemical properties of sinter and pellets. It is shown that the translation of the blast furnace in the operation with a high degree Non-fluxed pellets in batch furnaces need to change the basic parameters of the slag mode and download mode stoves. It was found that because of the differences in physical and mechanical properties of sinter and pellets, as well as due to the high aggressiveness of primary slag produced from the Non-fluxed pellets, it is necessary to change the mode of loading materials into the furnace. With an increase in the proportion of pellets Sokolovsko-Sarbai mining and processing production association (SSGPO) in the charge of blast furnaces OJSC «ММК» decrease of magnesia in the final blast furnace slag. This is accompanied by an increase in the viscosity of the molten slag, reducing its seropoglatitelnoy abilities, as well as higher melting range iron mixed with the lower increase in pressure drop of gas and limiting boost smelting blast.

Keywords: pellets, sinter, physico-chemical properties, the ratio of cost efficiency, the consumption of coke, slag properties.

Для производства чугунов в доменных печах России используется смесь железорудного сырья, состоящая из агломерата и окатышей. По данным 2012 г., расход железорудных окатышей в шихте печей России менялся от 0,32 до 1,54 т/т чугуна. На большинстве металлургических предприятий РФ расход окатышей в железорудной части шихты составляет 20–40 % и лишь в доменных печах Саткинского и Косогорского металлургических заводов достигает 80–100 % [1].

По заключению ряда отечественных и зарубежных специалистов наиболее приемлемым для доменной плавки является дробленый и отсеянный от мелочи агломерат. Однако ряд проблем – сложность спекания тонкоизмельченных железорудных концентратов, ограничение прочностных характеристик в зависимости от основности агломерата, сложность оборудования для тщательной механической обработки и классификации спека – ограничивает развитие агломерационного производства.

Стремление создать эффективное железорудное сырье для доменного передела обусловило развитие процессов обогащения руд с получением концентрата, содержащего до 69–70 % железа, но весьма тонкоизмельченных и трудноспекаемых при агломерации. Для таких железорудных материалов более целесообразным оказалось их окускование с последующим окислительным обжигом, т.е. получение железорудных окатышей. В ряде зарубежных стран (Германия, Швеция) агломерацию стараются исключить из схемы подготовки сырья по экологическим соображениям для снижения пылеобразования и выбросов углекислоты и сернистых газов в воздушное пространство.

Железорудные окатыши в сравнении с агломератом имеют ряд преимуществ.

1. Они характеризуются высоким содержанием железа, хорошо транспортабельны и могут перевозиться на большие расстояния в отличие от агломерата.

2. Окатыши подлежат длительному хранению на складах, в то время как агломерат при хранении рассыпается с образованием большого количества мелочи и его дальнейшее использование в доменном переделе становится невозможным.

3. При меньшей доле кремнезема в окатышах по сравнению с агломератом меньше и потребность в известняке для офлюсования окатышей.

4. При использовании богатых железорудных окатышей в доменном переделе сокращается их расход и выход шлака.

5. Преимуществом окатышей в сравнении с агломератом является также высокая их восстановимость, обусловленная большой пористостью. Это обеспечивает повышение степени использования газа в верхней ступени теплообмена печи и соответствующее снижение энергоемкости плавки.

Основным преимуществом разноосновной шихты, состоящей из высокоосновного агломерата и неофлюсованных окатышей, является высокая горячая прочность окатышей. Это предопределяет пониженное сопротивление шихты газовому потоку и способствует интенсификации доменной плавки дутьем за счет уменьшения верхнего перепада.

Восстановимость неофлюсованных окатышей в сравнении с агломератом ниже, но с увеличением основности показатели восстановимости агломерата и окатышей сближаются. В ряде случаев отмечается, что в результате восстановительно-тепловой обработки газами наблюдается «разбухание» и разупрочнение окатышей с образованием большого количества мелочи и возрастанием газодинамического сопротивления верхнего слоя шихты движению газового потока [3–5].

Неофлюсованные железорудные окатыши имеют в своей основе низкоплавкую фаялитную составляющую ($2\text{FeO} \times \text{SiO}_2$) и начинают плавиться при низкой температуре, что приводит к появлению первичного шлакового расплава с высоким содержанием в нем монооксида железа (FeO), характеризующегося чрезвычайно высокой агрессивностью к огнеупорной кладке печи. Контакт такого шлака с кладкой печи приводит к значительному сокращению срока службы огнеупоров.

Полученные расчетные данные о вязкопластичных характеристиках применяемых в доменном цехе ОАО «ММК» железорудных материалах показывают на значительные различия температур начала размягчения и температур расплавления агломерата ММК в сравнении с привозными окатышами низкой основности (таблица) [10, 11].

Температурные характеристики плавления железорудных материалов

Температурные характеристики плавления материалов	Агломерат ММК	Окатыши ССГПО	Окатыши Михайловского ГОКа	Окатыши Лебединского ГОКа
Температура размягчения, °C	1219	1088	1093	1095
Температура расплавления, °C	1390	1488	1452	1458
Температурный интервал плавления, °C	171	400	359	363

Окатыши ССГПО имеют низкие температуры начала размягчения 1088 °C, высокие температуры расплавления 1488 °C, что приводит к чрезмерно высокому температурному интервалу плавления, достигающему 400 °C. Вязкопластичные характеристики окатышей Лебединского ГОКа имеют значения, близкие к окатышам Михайловского ГОКа: расчетное значение температуры начала размягчения этих окатышей составляет 1093–1095 °C, температура расплавления – 1452–1458 °C, а температурный интервал плавления – 359–363 °C. В отличие от окатышей температурные характеристики плавления агломерата ММК более благоприятные для реализации эффективной доменной плавки: температура начала размягчения 1219 °C, температура расплавления 1390 °C и узкий температурный интервал плавления – 171 °C. В этом случае из-за увеличения толщины вязкопластичной зоны шлакообразования доменная плавка неофлюсованных железорудных окатышей в печи будет характеризоваться повышенным нижним перепадом давления газов и ограниченной вследствие этого интенсивностью плавки. Это было подтверждено опытными плавками на доменных печах ОАО «ММК» при проведении промышленных плавкок неофлюсованных окатышей ССГПО, когда расход окатышей менялся от 30 до 100 % [3, 9].

Ухудшение технических показателей доменной плавки наблюдалось и при использовании окатышей Центрального горно-обогатительного комбината в доменных печах Украины [2]. Несмотря на то что содержание железа в этих окатышах было на 3,0–3,5 % выше, чем в агломерате, при повышении содержания окатышей на каждые 10 % производительность печи снижается

в среднем на 0,8 %, а расход кокса увеличивается на 0,9 %. Эффективность применения указанных окатышей снижалась из-за их низкой основности по сравнению с основностью агломерата ($\text{CaO/SiO}_2 = 1,25\text{--}1,30$). По данным этой работы эффект от замены агломерата неофлюсованными окатышами близок к нулю из-за образования в нижней части шахты конгломератов с низкой газопроницаемостью. Во всех опытных плавках экономия кокса после замены относительно бедного агломерата более богатым по содержанию железа окатышами была сравнительно небольшой и обуславливалась, в первую очередь, уменьшением выхода шлака.

Надежды на высокую эффективность использования частично офлюсованных рядовых окатышей с 6,5–8,5 % кремнезема не оправдались. Опытные плавки и регулярная работа печей с разной долей в шихте окатышей, полученных на отечественных и некоторых зарубежных фабриках окомкования, оказались менее эффективными по сравнению с агломератом. Считается, что это обусловлено главным образом недостаточной прочностью комков в условиях доменной печи [4]. Отмечается, что в восстановительной среде печи, активируемой щелочами и другими компонентами, поверхность окатыша металлизируется с образованием слабопроницаемой для газов металлической корочки, затрудняющей проникновение восстановителя внутрь комка.

В зависимости от состава и высокотемпературных свойств окатышей в них может образовываться большое количество вюститного материала, который при относительно невысокой температуре (1000–1050 °C) превращается в жидкость, выделяющуюся при разрыве металлической оболочки. Чем больше кремнезема в составе окатышей, тем больше масса расплава (фаялита), обладающего агрессивными свойствами (вызывающими разрушение кокса, неустойчивость плавки), негативно влияющего на характер формирования и стабильность продуктов плавки.

Попытки ослабить негативное поведение рядовых окатышей при восстановительно-тепловой обработке в печи с образованием агрессивных жидких фаз путем повышения основности окатышей до уровня основности агломерата оказались экономически невыгодными из-за значительных затрат на измельчение до тонкого состояния большого количества флюсов.

В связи с этим сложилось мнение о том, что долю окатышей в доменной шихте нужно ограничить 10–25 %, особенно на предприятиях, где есть агломерационное производство [1]. Стремление получить окатыши более высокого качества для доменной плавки привело к получению более богатых железорудных концентратов, в которых содержание кремнезема снижалось до 1–3 %. В этом случае возникла целесообразность введения магнийсодержащих компонентов в состав окатышей и отказ от офлюсования их известью. Подбор соответствующего количества магнезии позволяет получать смесь ее с вюститом, обладающую заданной температурой плавления. [1].

Магнезиальные окатыши по сравнению с окатышами, офлюсованными известняком, имеют более высокую температуру размягчения и плавления. Присутствие в окатышах магнийсодержащих компонентов существенно меняет характер их поведения в доменной печи в процессе плавки. Появляющаяся при восстановлении в объеме таких окатышей вюститная фаза обладает с магнезией полной взаимной растворимостью. Поэтому с увеличением

количества магнезии в сочетании с вюститом повышается температура солидуса и ликвидуса. Соединения, в которых присутствует магнезия, наиболее тугоплавки.

Оксид магния вводят в состав железорудного сырья в целях оптимизации свойств доменного шлака. Установлено, что работа на магниезиальных шлаках до 9,5 % улучшает технологические показатели доменного процесса, расширяя область устойчивых шлаков. При этом повышается их десульфуризационная способность, что способствует получению качественного чугуна.

В состав окатышей оксид магния вводят либо с магнийсодержащими флюсами (доломитизированный известняк), либо в виде оливинов (природный минерал в виде силиката магния и железа – $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$).

Практика показывает, что оливиновые окатыши с содержанием $\text{SiO}_2 < 3\%$ обеспечивают высокие показатели доменной плавки при 100 %-м содержании их в шихте и хорошо сочетаются с технологией вдувания твердого топлива до 200 кг/т чугуна. Доменные печи SAAB в Лелео (Швеция) в течение более 10 лет проплавливали богатые оливиновые окатыши ($\text{MgO} - 2\%$, SiO_2 – от 1,5 до 2,7 %). Металлургические свойства таких окатышей, т.е. их поведение в печи, аналогично агломерату. Стабильная работа печей была обеспечена улучшением конструктивных особенностей печи для улучшения охлаждения шахт и контроля состояния гарнисажа. Удельная производительность печей достигает 3,64 т/(м³·сут), расход кокса равен 280–300 кг/т, суммарный расход топлива 450–460 кг/т и выход шлака 150–160 кг/т [1]. Из-за низкой основности оливиновых окатышей использовали сырой флюс. Попытки офлюсовать оливиновые окатыши известью для исключения загрузки в печь сырого флюса вызвало появление спеков окатышей, что существенно ухудшило сход шихты в печи.

В настоящее время железорудная часть доменных печей ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» включает агломерат, производимый на собственной агломерационной фабрике, и привозные железорудные окатыши ССГПО, Михайловского, Лебединского и Качканарского ГОКов. Основность производимого агломерата ММК меняется в зависимости от доли окатышей в шихте печей. В период работы доменного цеха в январе – мае 2014 г. при доле нефлюсованных окатышей ССГПО в шихте 37,5–39,8 % (в доменных печах №№ 1 и 9), основность агломерата ММК менялась в пределах $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,64\text{--}1,80$. Анализ данных работы доменной печи № 1 ОАО «ММК» показывает, что за период с января 2011 г. по август 2013 г. доля окатышей в железорудной части шихты менялась от 20 до 40 %.

Несмотря на более высокое содержание железа в железорудных окатышах в сравнении с агломератом ММК (в агломерате содержание железа за период январь–апрель 2014 г. составило 54,4–55,3 %, в окатышах ССГПО – 62,7 %, в Михайловских – 63,2 %) удельная производительность доменной печи № 1 не возрастала.

Взаимосвязь производительности печи с содержанием окатышей в шихте отсутствует. Это наглядно демонстрируют данные, представленные на рис. 1. Отсутствует взаимосвязь и расхода кокса с долей окатышей в шихте (рис. 2).

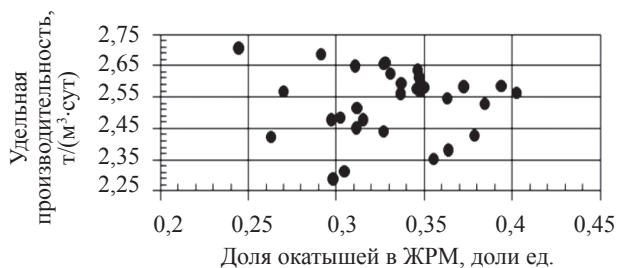


Рис. 1. Взаимосвязь удельной производительности доменной печи № 1 ММК с долей окатышей в шихте (период работы печи с января 2011 г. по август 2013 г.)

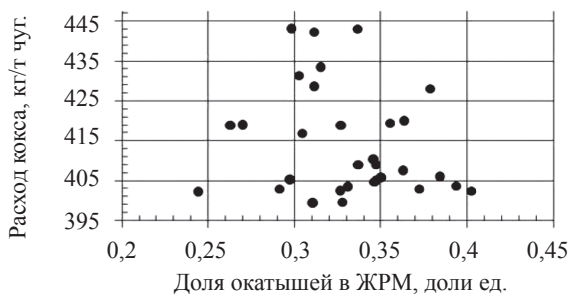


Рис. 2. Взаимосвязь удельного расхода кокса с долей окатышей в шихте (период работы печи № 1 с января 2011 г. по август 2013 г.)

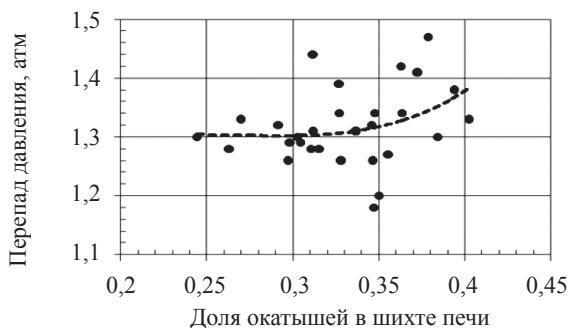


Рис. 3. Взаимосвязь перепада давления газа «фурмы-колошник» с долей железорудных окатышей в шихте печи № 1 ММК (по данным работы печи с января 2011 г. по август 2013 г.)

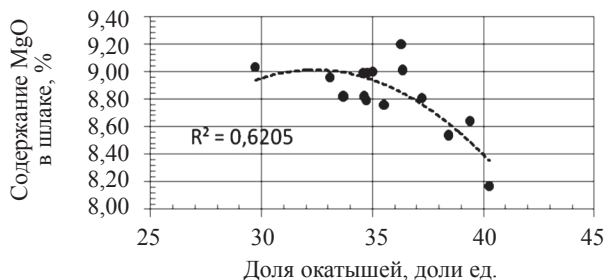


Рис. 4. Зависимость содержания магнезии в конечном доменном шлаке от доли окатышей в шихте доменной печи № 1 ММК

Увеличение доли окатышей в железорудной части шихты в печах ММК сверх 35 % сопровождается возрастанием газодинамического сопротивления столба шихты в печи. Анализ данных работы печи № 1 по выявлению взаимосвязи перепада давления газа по высоте слоя шихты с ростом доли окатышей в шихте показывает на повышение значения ΔP «фурмы-колошник» при превышении доли окатышей свыше 35 % (рис. 3).

По мере возрастания доли окатышей в железорудной части шихты изменяется состав шлака – содержание магнезии в конечном шлаке снижается (рис. 4).

Снижение концентрации магнезии в шлаке с ростом доли окатышей ССГПО и Михайловского ГОКа объяснимо – это обусловлено меньшим содержанием MgO в железорудных окатышах в сравнении с агломератом, производимом на агломашинах ММК. В отмеченный период минимальная концентрация магнезии в шлаке было равной $MgO^{\min} = 7,81 \%$, максимальное содержание – $MgO^{\max} = 8,92 \%$ при среднем значении $MgO^{\text{ср}} = 8,44 \%$.

При повышенной концентрации магнезии появляющаяся при восстановлении в объеме окатышей вуститная фаза обладает с магнезией полной взаимной растворимостью и поскольку соединения, в которых присутствует магнезия, тугоплавки, то имеет место повышение температуры начала плавления и температуры расплавления железорудного сырья. В результате таких минеральных преобразований снижается температурный интервал плавления ЖРМ, уменьшается толщина зоны пластичности и улучшаются газодинамика зоны когезии.

Для построения зависимости вязкости шлака от его основности CaO/SiO_2 использовалась диаграмма вязкости трехкомпонентной шлаковой системы $CaO \times MgO \times SiO_2$ [6]. На основе этой диаграммы были построены зависимости вязкости шлака при температуре $1500^\circ C$ от его основности. Анализ полученных зависимостей показывает, что при достижении определенного содержания MgO в шлаке происходит резкое повышение его вязкости, при этом предельная концентрация магнезии в шлаке зависит от основности шлака (CaO/SiO_2). Так, при концентрации магнезии в шлаке, равной $MgO = 8,0 \%$, резкое возрастание вязкости шлака при температуре $1500^\circ C$ будет наблюдаться при основности шлака $CaO/SiO_2 = 1,15$, при $MgO = 10,0 \%$ при $CaO/SiO_2 = 1,08$, при $MgO = 12,0 \%$ недопустимый рост вязкости будет наблюдаться при основности шлака $CaO/SiO_2 = 1,05$, а при установлении содержания магнезии в шлаке 15% – при $CaO/SiO_2 = 0,90$ (рис. 5).

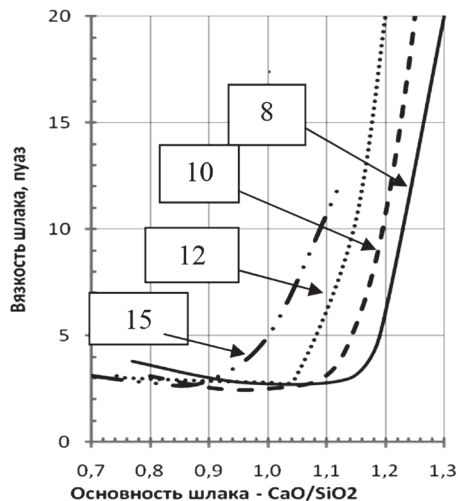


Рис. 5. Зависимость вязкости шлаков от основности шлака (CaO/SiO_2) при температуре $1500^\circ C$ при разном содержании магнезии (цифры у кривых – содержание магнезии в шлаке)

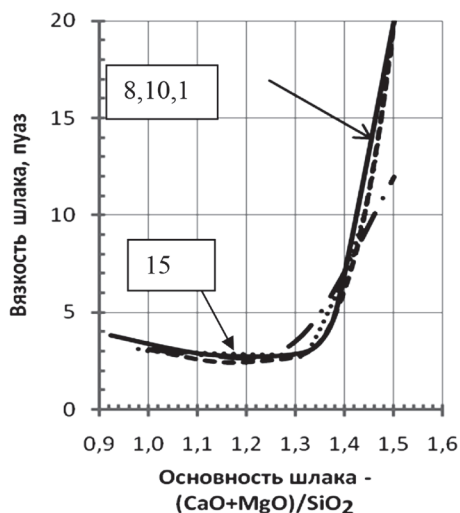


Рис. 6. Зависимость вязкости шлаков от основности шлака $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ при температуре 1500 °С при разном содержании магнезии; обозначения те же, что и на рис. 5

Построение кривых вязкости шлака от основности шлака с вводом в этот показатель концентрации оксида магния — $B_2 = (\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ намного упрощает взаимосвязь указанных параметров (рис. 6). Кривые вязкости шлаков, содержащие 8, 10 и 12 % магнезии сливаются практически в одну кривую и резкое возрастание вязкости этих шлаков происходит

при основности шлака $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2 \sim 1,32$. При достижении содержания магнезии в шлаке $\text{MgO} = 15\%$ предельное значение основности шлака снижается до значения $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2 = 1,25$.

На рис. 7 по данным работы печи № 1 ММК (январь 2011–август 2013 г.) выявлена зависимость коэффициента распределения серы между шлаком и чугуном ($L_s = (\text{S})/[\text{S}]$) от основности шлака — $((\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2)$. Данные рис. 7 подтверждают известные закономерности изменения коэффициента распределения серы между шлаком и чугуном.

По мере увеличения доли неофлюсованных окатышей в железорудной части шихты повышается ее кислотность и для получения заданной основности шлака необходима загрузка в печь основных флюсов. При этом следует иметь в виду, что загрузка в печь «сырого» известняка крайне нежелательна. Поэтому возрастание доли окатышей в шихте доменных печей ОАО «ММК» потребует перевод аглопроизводства комбината на получение агломерата повышенной основности. При производстве такого агломерата необходимо введение в аглошихту магнийсодержащих компонентов для достижения в доменном шлаке требуемого количества магнезии.

При использовании шихты с большой долей железорудных окатышей в шихте печей из-за различия в физических свойствах агломерата и окатышей необходимо менять режим загрузки печей [7]. Угол откоса у

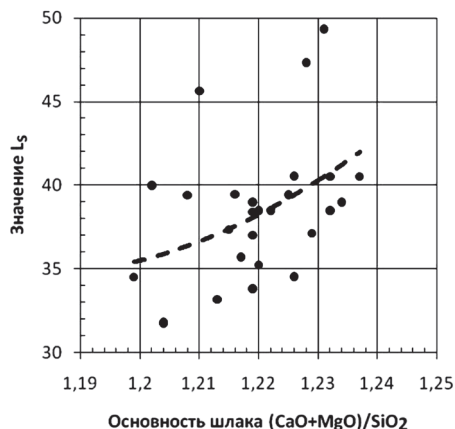


Рис. 7. Зависимость коэффициента распределения серы между шлаком и чугуном от основности шлака (по данным работы доменной печи № 1 ММК)

агломерата больше угла для окатышей существенно различаются, что изменяет распределение загружаемых железорудных материалов на колошнике печи. При загрузке окатышей на слой агломерата окатыши в силу меньшего по сравнению с агломератом угла откоса будут концентрироваться в осевой зоне доменной печи. И наоборот, загружаемый на слой окатышей агломерат будет в большей степени сосредотачиваться у стен доменной печи. Таким образом, замена агломерата в составе шихты окатышами влечет существенное изменение распределения шихты по сечению печи, а следовательно, и газового потока.

При увеличении расхода окатышей по этой причине периферийная часть печи может оказаться «открытой», а центральная – загруженной рудной частью. Из-за меньшего коэффициента внутреннего трения и большей насыпной массы окатышей может происходить вытеснение кокса окатышами, а также проникновение их в слой кокса с «размыванием» слоевой структуры.

Лабораторными исследованиями на моделях выявлено, что при загрузке модели прямыми подачами (РРКК↓) на колошнике печи формируется слой шихты с послышной укладкой. Однако в процессе опускания шихты кокс в значительной степени вытесняется в осевую зону печи. При этом сплошность коксовых окон в нижней и даже в средней части шахты нарушается или коксовые окна вообще отсутствуют. При таком распределении форма зоны когезии имеет Л-образную форму с высоко поднятой вершиной. При загрузке модели обратными подачами (ККРР↓) часть кокса образует тонкое кольцо непосредственно у стен доменной печи. Основная же часть кокса, так же как и при загрузке прямых подач, вытесняется в осевую зону печи. Такое распределение шихтовых материалов определяет распределение газового потока и зоны когезии в форме «W» с менее выраженной вершиной. При раздельной загрузке агломерата и кокса четырехскиповыми подачами АААА↓ КККК↓ высота коксовых окон увеличивается в два раза, а при опускании шихты в доменной печи коксовые окна сохраняются по всей высоте шахты и распара.

Опыт работы доменных печей с раздельными подачами агломерата и кокса показывают на целесообразность использования таких систем. При этом экономия удельного расхода кокса достигает в ряде случаев 20–25 кг/т чугуна.

На доменных печах, оборудованных бесконусными загрузочными устройствами (БЗУ), реализованы новые приемы загрузки шихтовых материалов при использовании рудной смеси из агломерата и окатышей. По мнению как отечественных, так и зарубежных технологов в периферийной зоне колошника следует ограничивать долю неофлюсованных окатышей, поскольку это приводит к скорейшему выходу из строя «сухой зоны» шахты доменной печи, а первичный шлаковый расплав таких окатышей усиливает эрозию футеровки печи и повышает вероятность прогара воздушных фурм.

Один из способов, ограничивающих концентрацию окатышей в периферийной зоне колошника (при конвейерной загрузке печи), заключается в формировании на конвейере железорудной порции с головной частью из агломерата без окатышей. Другой прием представляет собой способ загрузки, при котором в пристеночной зоне колошника образуется замкнутое кольцо из агломерата (так называемый «валик»).

Таким образом, при увеличении доли неофлюсованных железорудных окатышей в шихте доменных печей помимо внесения изменений в параметры шлакового режима плавки необходимо решать вопросы рациональной загрузки разноосновной шихты в доменную печь.

Выводы

1. При переводе доменной плавки на режим работы с высокой долей неофлюсованных окатышей в шихте печей необходимо менять основные параметры шлакового режима, а также режим загрузки печей.

2. При возрастании доли окатышей ССГПО в шихте доменных печей ОАО «ММК» наблюдается снижение магнезии в конечных доменных шлаках. Это сопровождается возрастанием вязкости шлакового расплава, снижением его серопоглотительной способности, а также ростом температурного интервала плавления железорудной смеси с увеличением нижнего перепада давления газа и ограничением форсировки плавки дутьем.

3. Внедрение технологии работы доменных печей с повышенной долей неофлюсованных окатышей предполагает переход аглопроизводства ОАО «ММК» на спекание высокоосновных агломератов с регулируемым содержанием магнезии.

4. Из-за различия в физико-механических свойствах агломерата и окатышей, а также вследствие высокой агрессивности первичных шлаков, получающихся из неофлюсованных окатышей, необходимо менять режим загрузки материалов в печь.

5. Длительная работа доменных печей на шихте, состоящей из окатышей, требует конструктивных изменений печи и улучшения качества окатышей.

Список использованных источников

1. Большаков В.И., Gladkov H.A., Орел Г.И., Оторвин П.И. Исследование металлургических свойств окатышей и особенностей их использования // *Сталь*. – 2004. – № 10. – С. 6–12.
2. Работа доменных печей с применением окатышей ЦГОКа / С.Т. Плискановский, А.А. Шокул, Д.В. Гулыга // *Металлург*. – 1972. – № 12. – С. 4–6.
3. Применение высокоосновного агломерата и неофлюсованных окатышей в доменной плавке / В.С. Новиков, Н.Н. Бабарыкин, Б.А. Марсуверский и др. // *Черная металлургия*. – 1972. № 3. – С. 1–14.
4. Алексеев Л.Ф., Горбачев В.А., Кудинов Д.З. и др. *Структура и разрушение окатышей при восстановлении*. – М.: Наука, 1983. – 78 с.
5. Юсфин Ю.С., Базилевич Т.И. *Обжиг железорудных окатышей*. – М.: Металлургия, 1973. – 272 с.
6. *Атлас шлаков. Перевод с немецкого Жмойдина Г.И.* / Под ред. И.С. Куликова. М.: Металлургия, 1985. – 208 с.
7. Эффективность распределения окатышей в шихте доменных печей / В.И. Большаков, Н.А. Gladkov, Ф.М. Шутылев, Ю.А. Богачев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 6. – С. 11–15.
8. Эффективность распределения окатышей в шихте доменных печей / В.И. Большаков, Н.А. Gladkov, Ф.М. Шутылев, Ю.А. Богачев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 6. – С. 11–15.
9. Опытные плавки с изменением в доменной шихте ММК доли неофлюсованных окатышей ССГОК от 0 до 100 % / З.И. Некрасов, Н.А. Gladkov, Ю.В. Яковлев и др. // *Сталь*. – 1978. – № 1. – С. 11–18.
10. Онорин О.П. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спиринов, Л.Ю. Гилева и др. / Под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – 301 с.
11. Спиринов Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю. [и др.]. *Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии* / Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.